

Применение аэрологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере

И. В. Букрин, А. В. Гусев , С. И. Кудинов, В. Э. Иванов, О. В. Плохих, С. Н. Шабунин

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

 a.v.gusev@urfu.ru

Аннотация

В настоящее время для обеспечения оперативных прогнозов погоды и климата широко используются радиолокационные и радионавигационные системы аэрологического зондирования атмосферы с помощью запускаемых в атмосферу аэрологических радиозондов. Для получения оперативных данных о свободной атмосфере разработаны и эксплуатируются метеорологические радиолокационные системы различного назначения, обеспечивающие измерение метеорологических параметров неконтактными методами. Одним из важнейших метеорологических параметров, является вертикальный профиль ветра. Для определения распределения направления и скорости ветра по высоте созданы специализированные радиолокаторы, позволяющие измерять динамические параметры ветра в реальном масштабе времени. В статье рассматривается возможность создания радиолокатора параметров ветра приземной атмосферы на основе модернизации серийного отечественного аэрологического радиолокатора. Технические характеристики радиолокатора – импульсная мощность передающего устройства, чувствительность приемного устройства, возможность точного управления диаграммой направленности антенны по угловым координатам позволяют принципиально обеспечить измерение ветра в приземном слое атмосферы. Основные вопросы модернизации связаны с необходимостью реализации когерентного режима работы приемопередающей системы радиолокатора и обеспечение когерентного накопления энергии отраженного сигнала в течение интервала статистической устойчивости атмосферы. Информация о ветре на измеряемой высоте оценивается по доплеровскому спектру отраженного сигнала от метеорологических неоднородностей. Возможность точного наведения антенны в течение сеанса зондирования позволяет определять вертикальный профиль ветра в диапазоне высот даже в условиях ясного неба.

Ключевые слова

радиолокатор, зондирование атмосферы, метеорологические параметры атмосферы, профиль ветра, когерентное накопление, зондирую-

щие радиоимпульсы, фазовый шум, спектр доплеровского сигнала, коэффициент шума приемника

Для цитирования

Букрин И. В., Гусев А. В., Кудинов С. И., Иванов В. Э., Плохих О. В., Шабунин С. Н. Применение аэрологического радиолокатора для определения профиля ветра в приземной атмосфере. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):32–48. DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.003.

Application of aerological radar to determine the wind profile in the lower troposphere

I. V. Bukrin, A. V. Gusev✉, S. I. Kudinov, V. E. Ivanov, O. V. Plokhikh, S. N. Shabunin

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ a.v.gusev@urfu.ru

Abstract

Currently, radar and radionavigation systems for aerological sounding of the atmosphere with the help of aerological radiosondes launched into the atmosphere are widely used to provide operational weather and climate forecasts. Meteorological radar systems for various purposes have been developed to obtain operational data on the free atmosphere. The systems are operated, providing measurement of meteorological parameters by non-contact methods. One of the most important meteorological parameters is the vertical wind profile. Specialized radars have been created to determine the distribution of wind direction and speed by altitude. They allow measuring the dynamic parameters of the wind in real time. The article considers the possibility of creating a radar for the wind parameters measuring the lower troposphere based on the modernization of a serial domestic aerological radar. Technical characteristics of the radar such as the pulse transmitting power, the sensitivity of the receiver, the ability to control the antenna radiation pattern accurately by angular coordinates make it possible to provide fundamental wind measurement in the lower troposphere. The main issues of modernization are related to the need of implementation of the coherent operation mode into the radar receiver and transmitter and ensuring the coherent energy storage of the reflected signal during the interval of statistical stability of the atmosphere. The information about the wind at the measured altitude is estimated from the Doppler spectrum of the signal reflected from meteorological inhomogeneities. The ability to accurately point the antenna during the sounding session allows determination of the vertical wind profile in the altitude range, even in clear sky conditions.

Keywords

radar; atmospheric sounding; meteorological parameters of the atmosphere; wind profile; coherent accumulation; probing radio pulses; phase noise; Doppler signal spectrum, receiver noise coefficient

For citation

Bukrin I.V., Gusev A.V., Kudinov S.I., Ivanov V.E., Plokhikh O.V., Shabunin S.N. Application of aerological radar to determine the wind profile in the lower troposphere. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5(1):32–48. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2021.5.1.003.

Введение

Оперативные и надежные данные о метеорологических параметрах атмосферы необходимы для нормального функционирования многих отраслей народного хозяйства. Одной из важнейших характеристик атмосферы является ветер, сложный по структуре, динамичный, изменяющий пространственные параметры в большом масштабе за короткий интервал времени. В настоящее время в радиолокационной метеорологии сформировалось направление, связанное с разработкой методов и средств дистанционного измерения вертикального профиля ветра в атмосфере путем определения доплеровского смещения частоты отраженного сигнала от метеорологических неоднородностей. Основным техническим средством этого направления являются специализированные радиолокаторы профиля ветра (РПВ), в зарубежной литературе называемые профайлерами [1–4]. Одним из главных преимуществ приборов для профилирования ветра перед другими системами измерения ветра является их способность осуществлять непрерывный мониторинг поля ветра в автоматизированном режиме. Кроме того, они также могут использоваться для обнаружения осадков, измерения основных параметров движений в вертикальном направлении, оценки интенсивности турбулентности и устойчивости атмосферы. РПВ также могут предоставлять подробную информацию о вертикальном профиле виртуальной температуры атмосферы за счет совместной работы с системами радиоакустического зондирования (РАСС) [5]. В СССР были созданы опытные образцы профайлеров, работающие в различных диапазонах частот [3]. В настоящее время в РФ разработан и находится в эксплуатации РПВ миллиметрового диапазона волн, а также имеется сеть доплеровских метеорологических радиолокаторов ДМРЛ-С, работающих в сантиметровом диапазоне длин волн [4; 6]. Однако в ясную погоду высота зондирования этих РЛС не превышает 2–3 км из-за того, что на малой длине волны отражения от турбулентных неоднородностей на больших высотах по уровню оказываются весьма незначительны. Поэтому для увеличения высоты зондирования, в соответствии с условием рассеяния Брегга [2], необходимо использовать более длинные волны. На аэрологической сети Росгидромета РФ и МО РФ для зондирования атмосферы с помощью радиозондов широко используются аэроло-

гические радиолокаторы, работающие в дециметровом диапазоне волн, которые при соответствующей модернизации принципиально могут быть использованы для определения параметров приземного ветра без запуска радиозондов. Насколько возможным будет использование диапазона частот 1680 ± 10 МГц для регистрации очень слабых отраженных сигналов зависит от электромагнитной обстановки в точке измерений, поскольку большое значение при проектировании ветровых профайлеров играет уровень помех в рабочем диапазоне частот. В статье обсуждается возможность создания модернизированной аэрологической РЛС, работающей в режиме РПВ.

Механизм формирования и оценка уровня отраженных сигналов от метеорологических неоднородностей

Динамические процессы, связанные с переносом водяного пара, пылевых облаков и осадков, формирования мощных теплообменных процессов в атмосфере имеют сложный турбулентный характер движений. Важнейшей технической проблемой для измерения профиля ветра в любых погодных условиях является необходимость обеспечения РЛС регистрации отраженных сигналов не только от крупных неоднородностей – осадков, облаков, аэрозолей, но и в ясную погоду от флуктуаций диэлектрической проницаемости атмосферы, связанных с турбулентными неоднородностями и несущими информацию об истинном ветре. Известно, что такого вида рассеяние наиболее интенсивно формируется на периодических неоднородностях, имеющих масштаб равный половине длины зондирующего излучения (рассеяние Брэгга). Физика формирования метеорологических неоднородностей такова, что их эффективный размер увеличивается с высотой исследуемого пространства. С увеличением высоты внутренний масштаб турбулентности, определяемый минимальными размерами турбулентных вихрей, увеличивается, поэтому, чем выше требуется высота зондирования, тем большую длину волны должен иметь зондирующий сигнал радиолокатора. В работе [7] приводятся рекомендуемые значения длин волн зондирующего сигнала, которые должны быть использованы для максимизации Брегговского отражения на различных высотах, см. табл. 1.

Таблица 1. Рекомендуемые длины волн зондирования атмосферы в условиях отражений от ясного неба

Table 1. Recommended wavelengths for sensing the atmosphere under conditions of reflections from a clear sky

H , км	1	5	10	20	25	30
λ_{\min} , см	5	10	15	25	50	100

Рабочая длина волны, рассматриваемой аэрологической РЛС, составляет $\lambda = 17,9$ см, следовательно, масштаб метеорологических неоднородностей должен составлять около 9 см. Необходимо отметить, что в мировой практике наибольшее применение получили профайлеры, работающие в диапазоне 900–1300 МГц [1]. Однако выделение такой же полосы частот в РФ не представляется возможным.

На рис. 1 приведена схема формирования отраженного сигнала от метеорологических неоднородностей. Приведены следующие параметры для описания характеристик отраженного сигнала: x, y, z – пространственные координаты; ε, β – угол места и азимут исследуемого объема пространства; R, H – наклонная дальность и высота отражающего объема; $\Delta R, d$ – длина и диаметр отражающего объема, соответственно. Пунктирными линиями показаны статистические центры метеорологических отражателей в направлении пеленга и диаметра исследуемого объема. Затемненная область рисунка показывает вертикальную плоскость визирования отражающего объема метеорологических неоднородностей.

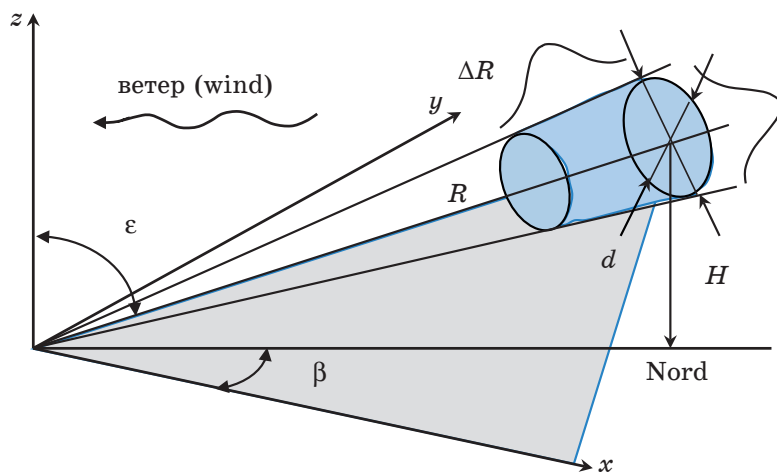


Рис. 1. Схема формирования отраженного сигнала от объема метеорологических неоднородностей

Fig. 1. Scheme of formation of the signal reflected from the volume of meteorological inhomogeneities

В классической радиолокации отражающие свойства одиночной цели оцениваются с помощью параметра σ – эффективной площади рассеяния (ЭПР), имеющей размерность м^2 . В радиолокационной метеорологии отраженный сигнал формируется от атмосферных неоднородностей, представляющих собой цели, распределенные в объеме зондирования $V, [\text{м}^3]$, рис. 1 [2; 7]. Для

оценки отражающих свойств таких целей используют удельную радиолокационную отражаемость единицы объема – η :

$$\eta = \frac{\sigma}{V}. \quad (1)$$

Для оценки уровня отражений от метеорологических неоднородностей разной физической природы (дождь, снег, облака и т.д.) используется величина радиолокационной отражаемости Z , [мм⁶/м³]. С целью определения уровня минимальных отражений от ясного неба (ОЯН) вводится структурная характеристика флуктуаций коэффициента преломления воздуха C_n^2 , м^{-2/3}. Физически ОЯН определяются неоднородностями показателя преломления воздуха, связанными с турбулентностью атмосферы. Они могут быть оценены параметрами η и C_n^2 :

$$\eta_1 = 0,38 C_n^2 \lambda^{-1/3}, \text{ м}^{-1} \quad (2)$$

В зависимости от метеоусловий радиолокационная отражаемость, связанная с турбулентными неоднородностями, изменяется в значительных пределах от сильного уровня $C_n^2 = 10^{-14}$ до слабого $C_n^2 = 10^{-16}$, м^{-2/3}. Для проведения оценочных расчетов в работе [3] предложено эмпирическое соотношение, моделирующее величину C_n^2 как функцию от высоты исследуемого объема:

$$C_n^2 = 10^{-(15,5 + 0,2H)}. \quad (3)$$

Опыт эксплуатации профайлеров показывает, что при использовании частоты излучения в диапазоне 1680 ± 10 МГц в условиях слабой турбулентности $C_n^2 = 10^{-16}$, м^{-2/3} и практически достижимых технических параметрах РЛС максимальная высота зондирования может составить до 4–5 км. С увеличением интенсивности турбулентности до средних и высоких значений $C_n^2 = 10^{-14} - 10^{-15}$, м^{-2/3}, высота эффективного зондирования может повышаться до верхней границы тропосферы.

Особенности формирования и обработки отраженных сигналов

Основное уравнение, определяющее зависимость мощности принятого отраженного сигнала $P_{\text{отп}}(R)$ от основных технических параметров радиолокационной системы и свойств отражающего метеорологического объекта, имеет вид [7]:

$$P_{\text{отп}}(R) = GL_{\Sigma} P_3 R^{-2} \eta \exp \left(- \int_0^R \alpha(R) dR \right), \quad (4)$$

где P_3 – мощность зондирующего сигнала; G – коэффициент усиления антенной системы; L_{Σ} – потери сигнала, связанные с распространением в СВЧ тракте РЛС; R – расстояние от РЛС

до рассеивающего объема; η – удельная радиолокационная отражаемость; $\alpha(R)$ – затухание сигнала в атмосфере.

Необходимо подчеркнуть, что показатель радиолокационной отражаемости η зависит от параметра C_n^2 (3) и степени заполнения рассеивающего объема метеорологическими отражателями, и при изменении их заполнения может существенно корректироваться.

Параметры горизонтального ветра определяются скоростью движения отражающего объема $V_r(x, y, H, t)$ и направлением $\beta_0(x, y, H, t)$ на высоте H . Величина доплеровского сдвига частоты отраженного сигнала F_D , в направлении зондирования и длина волны зондирующего сигнала связана с параметрами отражающего объема воздушного потока на высоте H соотношением [7]:

$$F_D = \frac{2}{\lambda} \{ V_r(x, y, H, t) \cos[\beta_3 - \beta_0(x, y, H, t)] \cos \varepsilon_3 \pm V_v(x, y, H, t) \sin \varepsilon_3 \}, \quad (4)$$

где V_r – горизонтальная составляющая ветра; V_v – вертикальная составляющая скорости метеорологических отражателей; x, y – координаты рассеивающего объема на высоте H ; ε_3 – угол места; β_3 направление зондирования по азимуту.

В объеме пространства, от которого получен отраженный сигнал, знак «+» в (4) соответствует нисходящему вертикальному потоку V_v , а знак «–» восходящему потоку V_v . Три неизвестные величины V_r , V_v , и α_3 на выбранной высоте могут быть определены минимум по трем измерениям при различных направлениях зондирования по азимуту.

Для определения параметров вертикального профиля ветра РЛС осуществляет зондирование атмосферы мощными когерентными радиоимпульсами. Метеорологическими отражателями, непосредственно связанными с движением воздушных масс – ветром, являются неоднородности диэлектрической проницаемости атмосферы. Период повторения радиоимпульсов РЛС – τ_n – определяет диапазон рабочих высот и диапазон измеряемых скоростей. Обычно он составляет десятки-сотни микросекунд. Принимаемый РЛС сигнал формируется от неоднородностей в отражающем объеме, эффективные размеры которого определяются длительностью радиоимпульсов (длиной отражающего объема – ΔR), шириной диаграммы направленности (диаметром отражающего объема – d) и значением исследуемого интервала высот H . Отраженный сигнал, порожденный одним коротким зондирующим радиоимпульсом, представляет собой статическую картину отражений от неподвижных неоднородностей в объеме. За один период повторения радиоимпульсов τ_n отражения от неоднородностей незначительно изменяют пространственное

хаотическое расположение. При облучении отражающего объема последовательностью радиоимпульсов РЛС может принимать и накапливать энергию отраженного сигнала в течение определенного времени, характеризующегося статистической устойчивостью параметров движения отражающих неоднородностей в атмосфере. Движения большого количества неоднородностей в отражающем объеме вызывает статистическое доплеровское смещение частоты отраженного сигнала относительно частоты зондирующего сигнала. В результате накопления энергии и обработки сигнала в течение интервала статистической устойчивости на выходе когерентной РЛС может быть построен спектр доплеровского сигнала в направлении линии зондирования. При этом с большой достоверностью распределение скоростей неоднородностей в исследуемом объеме подчиняется Гауссовскому закону. На рис. 2 показан спектр отраженного доплеровского сигнала скорости ветра в направлении зондирования.

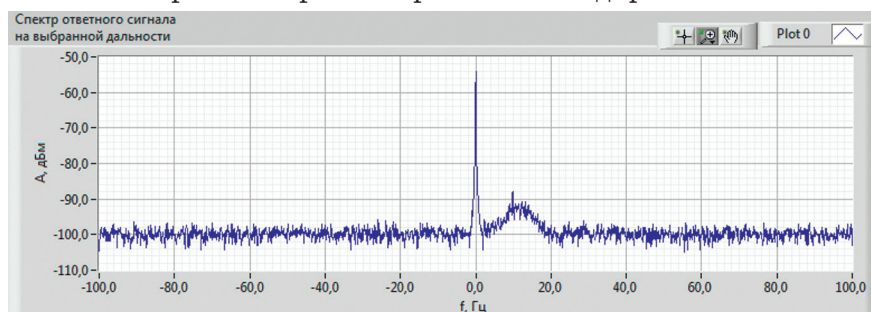


Рис. 2. Спектр доплеровского сигнала скорости ветра

Fig. 2. Spectrum of the Doppler wind speed signal

Сложный характер отраженного сигнала и низкое отношение сигнал/шум на входе приемного устройства РЛС (менее минус 20 дБ) вызывают необходимость использования априорной информации о спектральных и статистических характеристиках сигнала в процессе обработки информации.

Как отмечалось, динамические процессы в атмосфере имеют определенную инерционность – стационарность статистических параметров процессов. Учет этого фактора позволяет снизить погрешность оценивания параметров ветра за счет накопления статистической информации (энергии) в течение интервала стационарности и параметрической обработки спектральных и статистических характеристик сигнала.

Накопление энергии отраженного сигнала может осуществляться некогерентно и когерентно. Существует два способа осуществления некогерентного накопления – накопление огибающих детектированных сигналов и накопление спектров при-

нятых сигналов [2; 8]. Обеспечиваемый выигрыш в отношении сигнал/шум оценивается как \sqrt{N} раз при кратности накопления равной N . Эффект некогерентного накопления обеспечивается при условии, что среднеквадратическое отклонение скорости ветра $\delta(\sigma_v)$ от его среднего значения V_{cp} за время накопления не превышает спектральную ширину рассеянного сигнала [3; 8]:

$$\delta(\sigma_v) \leq \sigma_v. \quad (5)$$

Спектральная ширина рассеянного сигнала существенно зависит от характеристик атмосферной турбулентности и возрастает с увеличением степени турбулентности атмосферы. Кратность некогерентного накопления зависит от суммарного времени накопления, а также от выполнимости условия (5).

Другим методом повышения отношения сигнал/шум является когерентное накопление. Эта операция представляет собой векторное суммирование реализаций рассеянного сигнала. При суммировании N реализаций (кратность когерентного накопления N) получаемый энергетический выигрыш может достигать N раз. Это справедливо для случаев, когда время накопления меньше интервала стационарности рассеянного сигнала. Интервал стационарности атмосферных процессов оценивается соотношением [2; 3]:

$$T_k = 0,2 \frac{\lambda}{\sigma_v}, \text{ с}, \quad (6)$$

где λ – длина волны РЛС, а σ_v^2 – дисперсия скоростей ветра в импульсном объеме, в приземном слое атмосферы имеющая порядок 1м/с [1; 2].

При этом максимальная кратность когерентного накопления N_{\max} зависит от максимальной высоты H_{\max} и определяет диапазон однозначно определяемых скоростей [3]:

$$N_{\max} = \frac{0,1 c \lambda}{H_{\max} \sigma_v}. \quad (7)$$

В работе [7] для оценки оптимального времени накопления t_n вводится соотношение:

$$t_n = \frac{c n_p}{V_{\max} f_0}, \quad (8)$$

где c – скорость света; n_p – количество отчетов в реализации принимаемого сигнала.

Накопление энергии отраженного сигнала от исследуемого отражающего объема в течение определенного времени позволяет с помощью цифровой обработки построить спектр и оценить среднюю скорость V_{cp} движения метеорологических неод-

нородностей. На рис. 2 показан вид спектральной плотности отраженного радиолокационного сигнала от метеорологических неоднородностей атмосферы и местных предметов полученный на испытаниях макета РПВ. Положение максимума спектральной плотности доплеровского сигнала на некоторой высоте измерений характеризует среднее значения проекции скоростей рассеивателей $V_{\text{ср}}$ (м/с) в отражающем объеме в направлении зондирования. Огибающая спектра имеет в основном характер Гуссовского распределения. Определение параметров распределения позволяет выполнить оценку скорости и рассеяния скорости в отражающем объеме.

Анализ формы спектра отраженного сигнала также позволяет оценить время когерентного накопления. Гауссовская форма спектра с выраженной модой и малой дисперсией свидетельствует о времени накопления меньшей или равной времени статистической стационарности атмосферы. Чрезмерное увеличение времени накопления приведет к уплощению вершины спектра и нарастанию ошибки оценки скорости ветра.

Методы оптимальной оценки параметров спектра рассмотрены в работах [5; 8].

Особенности методики определения направления ветра

Информация о ветре заключается в доплеровском сдвиге частоты отраженного сигнала, которая оценивается путем анализа параметров спектра этого сигнала. Флуктуации частоты доплеровского смещения и других параметров спектра (мощности, дисперсия скоростей ветра в исследуемом объеме) в значительной степени определяются весьма малым (порядка минус 20 дБ) отношением сигнал/шум на входе приемного устройства РЛС.

На рис. 3 приведена схема осуществления зондирования для определения направления ветра. Вертикальное зондирование позволяет определить скорость движения метеорологических отражателей в вертикальном направлении (дождь, град). Измерение горизонтальной составляющей движения неоднородностей в отражающем объеме может быть осуществлено путем отклонения диаграммы направленности (ДН) РЛС от вертикального положения (рис. 3). Для увеличения уровня доплеровского смещения (горизонтальной составляющей ветра) необходимо отклонять направление зондирования на возможно больший угол от вертикали. Однако уровень отраженного сигнала от слоистых неоднородностей при этом резко уменьшается. Поэтому по результатам эксплуатации РПВ в различных метеорологических условиях рекомендуется отклонять направление ДН РЛС от вертикали на оптимальные углы $\gamma = 15\text{--}20^\circ$.

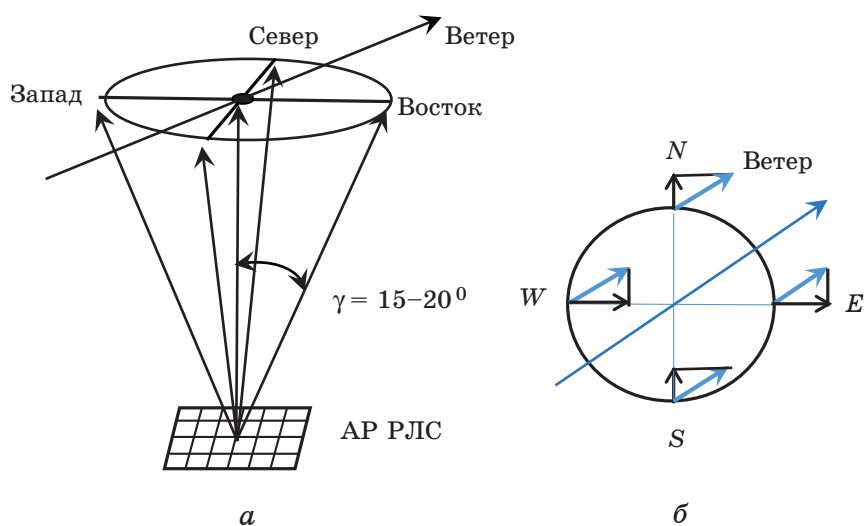


Рис. 3. Схема осуществления зондирования для определения направления ветра

Fig. 3. The scheme of sounding for determining the wind direction

Для определения направления и скорости ветра на высоте H измерения проводят, как правило, для четырех направлений в азимутальной плоскости ДН РЛС, как правило, ориентированных по сторонам Света, рис. 3а. На рис. 3б показаны измеряемые РПВ составляющие вектора ветра при произвольном направлении ветра. Практически для повышения точности измерения осуществляют в двух противоположных направлениях для каждого из четырех фиксированных направлений зондирования. Зондирование осуществляется также в вертикальном направлении. Это позволяет исключить составляющую вертикального движения неоднородностей за счет гравитационного падения из суммарного вектора ветра и снизить погрешность оценки горизонтального ветра. Оптимальный наклон диаграммы направленности РЛС относительно вертикали в пределах 15–20 градусов позволяет сохранить приемлемый уровень отраженного сигнала.

Накопление энергии на разных временных интервалах в пределах периода повторения радиоимпульсов $t_{\text{п}} = 50\text{--}75$ мкс, позволяет последовательно устанавливать требуемую высоту зондирования, осуществлять определение доплеровского спектра, построить вертикальный профиль скорости V_r (м/с) и направления ветра [9] в диапазоне исследуемых высот.

Для повышения точности измерения параметров ветра целесообразно после оценочного определения азимута направле-

ния ветра β развернуть ДН РЛС в данном направлении и повторить зондирование. Это принципиально позволит уменьшить погрешность измерения параметров ветра. Поэтому при разработке можно рекомендовать применение всенаправленной антенной системы в составе РПВ.

Особенности модернизации аэрологической РЛС

Для пояснения особенностей предлагаемой модернизации на рис. 4 приведена структурная схема РПВ разрабатываемая на основе аэрологической РЛС. Далее обсуждаются основные технические характеристики, предъявляемые к РПВ [9; 10].

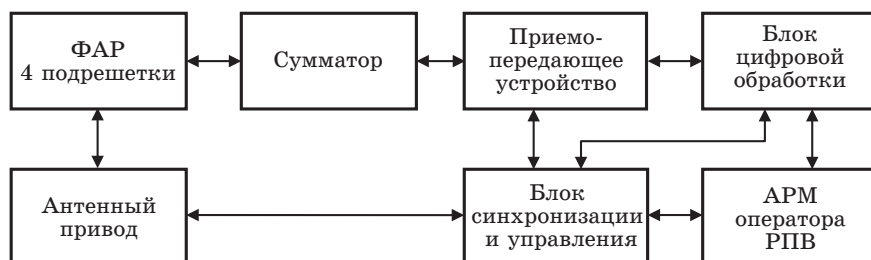


Рис. 4. Структурная схема РПВ, разрабатываемого на основе аэрологической РЛС

Fig. 4. Block diagram of the developed profiler on the basis of the aerological radar

Блок синхронизации и управления обеспечивает когерентный режим работы аналогового приемно-передающего устройства, временную синхронизацию блока когерентного накопления энергии отраженного сигнала и цифровой обработки информации, с помощью антенного привода осуществляет управление угловым положением диаграммы направленности (ДН) фазированной антенной решетки (ФАР) в автоматическом режиме или по командам оператора РПВ.

ФАР имеет эффективную площадь апертуры $S = 2,5 \text{ м}^2$ и состоит из 4 подрешеток (рис. 5). Сумматор/делитель в режиме профайлера обеспечивает синфазное излучение и прием сигнала.

Ширина ДН ФАР по уровню 3 дБ составляет $\Delta\varphi = 6,0$ градусов, коэффициент усиления антенны равен 28 дБ (рис. 6).

На рис. 7 приведена ДН ФАР радиолокатора в плоскостях E (розовый) и H (синий) при выключенном электронном сканировании. Электронное сканирование ДН для работы в режиме РПВ не используется. Уровень боковых лепестков ДН в горизонтальной плоскости определяет параметры защищенности от сторонних излучений и отражения от местных отражателей.

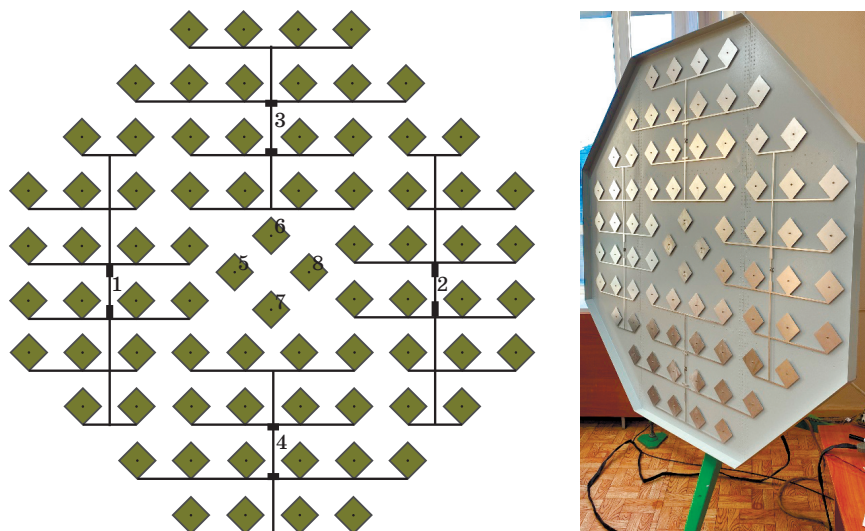


Рис. 5. Фазированная антенная решетка РПВ

Fig. 5. Radar antenna array

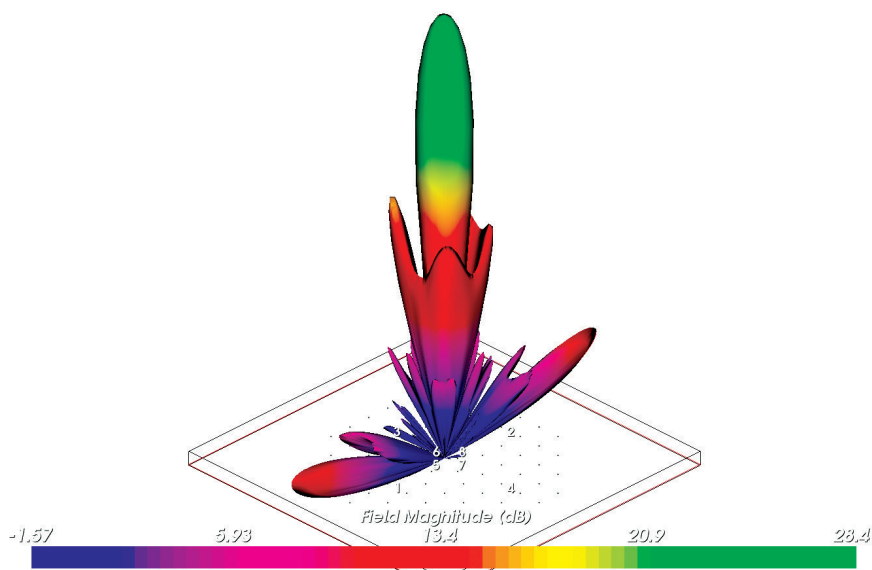


Рис. 6. 3D-диаграмма направленности ФАР РПВ

Fig. 6. 3D-radiation pattern of the radar antenna array

Антенный привод обеспечивает наведение ДН ФАР по углу места ε в пределах $0-180$ градусов, по азимуту β в пределах 0 ± 360 градусов с точностью не хуже $0,16$ градуса. Блок управления приводом обеспечивает любое направление ДН ФАР, необходимое для оптимального определения параметров ветра.

Диапазон рабочих частот когерентного приемо-передающего устройства составляет 1670–1690 МГц. Период следования зондирующих импульсов в режиме РПВ планируется установить в диапазоне $T_c = 50\text{--}75$ мкс. Это обеспечивает максимальную дальность измерений до 7,0–11 км.

При длительности радиоимпульсов $t_c = 0,5\text{--}1,0$ мкс разрешение параметров ветра по высоте составляет 75–150 м. Импульсная мощность излучения передатчика составляет около 700–800 Вт, средняя мощность излучения составляет 7–15 Вт. Особые требования предъявляются к когерентности излучающих импульсов передающего устройства РЛС, минимизации фазовых шумов зондирующих радиоимпульсов и синхронизации с системой цифровой обработки информации.

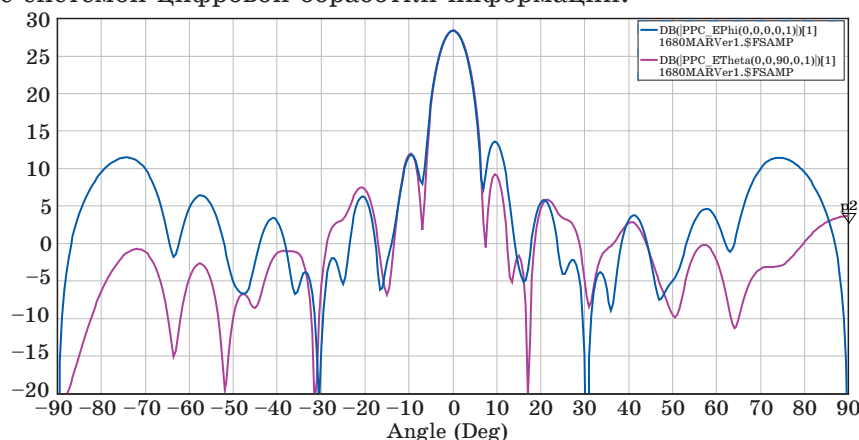


Рис. 7. Диаграмма направленности ФАР РПВ

Fig. 7. Radiation pattern of the radar antenna array

Чувствительность аналоговой части приемного устройства при полосе пропускания усилителя промежуточной частоты (УПЧ) 1,0–4,0 МГц составляет минус 132–136 дБ/Вт. Модернизация РЛС связана с необходимостью повышения реальной чувствительности в режиме РПВ до уровня минус 180–190 дБ/Вт за счет когерентного накопления энергии отраженного сигнала и цифровой фильтрации доплеровской частоты в блоке цифровой обработки информации, построенного на основе цифрового приемника.

Заключение

Проведенные оценки показывают, что технические характеристики когерентной аэрологической РЛС после соответствующей модернизации системы цифровой обработки информации могут отвечать требованиям необходимым для осуществления измерений параметров ветра в условиях ОЯН в диапазоне высот 300–4000 м.

Следует также отметить, что базовый режим работы аэрологической РЛС также может быть существенно усовершенствован за счет цифровой обработки принимаемого сигнала радиозонда. Это будет способствовать повышению качества и надежности работы системы аэрологического радиозондирования атмосферы Росгидромета.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по проекту 0836-2020-0020

Acknowledgments

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the project No. 0836-2020-0020

Список литературы

1. Dibbern J., Engelbart D. A. M., Goersdorf U. et al. *Operational aspects of wind profiler radars. Instruments and observing methods*. World meteorological organization, report. No. 79. WMO/TD No. 1196. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2003. Available at: <https://pdfslide.net/documents/operational-aspects-of-wind-profiler-radars.html>
2. Doviak R. J., Zrnic D. S., Sirmans D. S. Doppler weather radar. *Proceedings of the IEEE*. 1979;67(11):1522–1553. DOI: 10.1109/PROC.1979.11511.
3. Кащеев Б. Л., Прошкин Е. Г., Лагутин М. Ф. (ред.) *Дистанционные методы и средства исследования процессов в атмосфере Земли*. Харьков: Харьк. нац. ун-т радиоэлектроники; Бизнес Информ; 2002. 426 с.
4. Ефремов В. С., Вовшин Б. М., Вылегжанин И. С. Лаврукевич В. В., Седлецкий Р. М. Поляризационный доплеровский метеорологический радиолокатор С-диапазона со сжатием импульсов. *Журнал радиоэлектроники*. 2009;(10):321–325.
5. Литвин-Попович А. И., Щекин С. Р. Использование априорной информации при обработке сигналов в метеорологических РЛС. *Технологический аудит и резервы производства*. 2013;3(1):24–28.
6. Стерлядкин В. В., Кононов М. А. Расчет потенциала и оценка возможностей ветровой метеорологической РЛС мм диапазона длин волн. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2010;(158):52–59.
7. Горелик А. Г., Коломиец С. Ф., Шукин Г. Г. Информационные возможности ветровых профайлеров при зондировании атмосферы. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета*. 2011;(18):70–89.
8. Литвин-Попович А. И., Олейников В. Н. Повышение эффективности цифровой обработки сигналов РЛС вертикального зондирования атмосферы. *Прикладная радиоэлектроника*. 2008;7(4):400–403. Режим доступа: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/5967/1/Prikladnaja_radioelektronika-2008-4-68-71.pdf
9. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. *Радиозондирование атмосферы: технические и метеорологические аспекты разработки и при-*

менения радиозондовых измерительных средств. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ; 2004. 606 с.

10. Иванов В. Э. *Многорежимный аэрологический комплекс*. Патент RU № 2710965. Опубликовано 2020.01.14.

References

1. Dibbern J., Engelbart D. A. M., Goersdorf U. et al. *Operational aspects of wind profiler radars. Instruments and observing methods*. World meteorological organization, report. No. 79. WMO/TD No. 1196. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2003. Available at: <https://pdfslide.net/documents/operational-aspects-of-wind-profiler-radars.html>

2. Doviak R. J., Zrnic D. S., Sirmans D. S. Doppler weather radar. *Proceedings of the IEEE*. 1979;67(11):1522–1553. DOI: 10.1109/PROC.1979.11511.

3. Kashcheev B. L., Proshkin E. G., Lagutin M. F. (ed.) *Remote methods and means of studying processes in the Earth's atmosphere*. Kharkov: Kharkiv National University of Radio Electronics; Biznes Inform; 2002. 426 p. (In Russ.)

4. Efremov V. S., Vovshin B. M., Vylegzhanin I. S. Lavrukevich V. V., Sedletsky R. M. Polarizing Doppler meteorological radar of the C-band with pulse compression. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2009;(10):321–325. (In Russ.)

5. Lytvyn-Popovych A. I., Shchekin S. R. Apriori information usage in meteo radar signal processing. *Technology Audit and Production Reserves*. (In Russ.) DOI: 10.15587/2312-8372.2013.14895.

6. Sterlyadkin V. V., Kononov M. A. Calculation of potential and estimation of possibilities of a wind millimeter-wave meteorological radar. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*. 2010;(158):52–59. (In Russ.)

7. Gorelik A. G., Kolomiets S. F., Shchukin G. G. Information capabilities of wind profilers in atmospheric sounding. *Uchenye zapiski Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2011;(18):70–89. (In Russ.)

8. Litvin-Popovich A. I., Oleinikov V. N. Improving the efficiency of digital signal processing of a radar for vertical atmospheric sounding. *Prikladnaia elektronika = Applied Radio Electronics*. 2008;7(4):400–403. (In Russ.) Available at: https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/5967/1/Prikladnaja_radioelektronika-2008-4-68-71.pdf

9. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essyak S. P. *Radio sounding of the atmosphere: technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring instruments*. Ekaterinburg: Ural State Technical University; 2004. 606 p. (In Russ.)

10. Ivanov V. E. *Multi-mode aerological complex*. RU patent No. 2710965. Published on 2020.01.14. (In Russ.)

Информация об авторах

Букрин Илья Владимирович, аспирант, инженер Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: i.v.bukrin@urfu.ru

Гусев Андрей Викторович, старший преподаватель Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: a.v.gusev@urfu.ru

Кудинов Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

Иванов Вячеслав Элизбарович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

Плохих Олег Васильевич, старший преподаватель Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: o.v.plohih@urfu.ru

Шабунин Сергей Николаевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Уральского федерального университета. 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19; e-mail: s.n.shabunin@urfu.ru

Information about the authors

Ilya V. Bukrin, Post-graduate student, Engineer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: i.v.bukrin@urfu.ru

Andrey V. Gusev, Senior Lecturer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: a.v.gusev@urfu.ru

Sergey I. Kudinov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Institute of Radioelectronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

Vyacheslav E. Ivanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radioelectronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

Oleg V. Plokhikh, Senior Lecturer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira str., 32; e-mail: o.v.plohih@urfu.ru

Sergey N. Shabunin, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University. 620002, Ekaterinburg, Mira Str., 32; e-mail: s.n.shabunin@urfu.ru

Поступила / Received: 20.03.2021

Принята в печать / Accepted: 31.03.2021